# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
# MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE




УДК 673.7
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

*Научная статья*



EDN: LRSXPY

## Влияние армирования стекловолокном на механические свойства полиэстерных композитов

**И.Р. Антибас**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ Imad.antypas@mail.ru

**Аннотация**

***Введение.*** Стекловолокна существенно улучшают качество композитных материалов, делают их легче, прочнее, устойчивее к коррозии и термически стабильнее. В научной и прикладной литературе активно обсуждаются сильные и слабые стороны конкретных композитов. При этом недостаточно исследовано влияние соотношения волокон и материала матрицы на механические характеристики композитов. Представленная работа призвана восполнить этот пробел. Цели исследования — изготовление композиционного материала на полимерной основе, армированного стекловолокном, а также изучение влияния весовых соотношений элементов на механические характеристики композита. Впервые публикуется отчет о сопоставлении характеристик композитов (с различным содержанием волокна) друг с другом и со сталью.

***Материалы и методы.*** В качестве исходных материалов использовались стекловолокно и полиэстер с добавлением медиатора для ускорения процесса формования. Образцы изготавливались вручную и при помощи стандартного оборудования испытывались на растяжение, твердость и ударную прочность. Результаты обобщали в виде таблиц, визуализировали в виде графиков и обрабатывали методом сравнительного анализа.

***Результаты исследования.*** Показаны способ создания образцов и методы их испытаний. Изыскания позволили установить, что твердость, прочность на разрыв и устойчивость к удару возрастают с увеличением процентного содержания случайно распределенного стекловолокна до 50 % при 50 % ненасыщенного полиэстера. В этом случае достигаются максимальные значения прочности на разрыв — 175,4 МПа, твердости — 38 HV и ударопрочности — 1,56 Дж/мм$^2$. Экспериментально доказана нецелесообразность превышения доли стекловолокна более чем на 50 %, т. к. механические свойства ухудшаются. Это объясняется, в частности, хрупкостью стекла, которая при нарушении пропорций передается всему композиту. Кроме того, при чрезмерно высоком объеме армирующих волокон смолы будет недостаточно для качественного скрепления элементов, что существенно снизит прочность материала. Большинство механических характеристик композита из 50 % полиэстера и 50 % стекловолокна лучше, чем у стали.

***Обсуждение и заключение.*** Доказано, что свойства композитного материала существенно зависят от содержания стекловолокна. Полученный композит сравнили со сталью. Выяснилось, что он обладает лучшими механическими характеристиками и меньшим весом. Это позволяет рекомендовать использовать данный материал для изготовления корпусов лодок.

**Ключевые слова:** армирование стекловолокном, соотношение полиэстера и стекловолокна в композите, механические характеристики композита, сравнение композитных и стальных образцов

**Благодарности.** Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования:** Антибас И.Р. Влияние армирования стекловолокном на механические свойства полиэстерных композитов. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2023;23(4):387–397. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

*Original article*

# Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites

**Imad Rezakalla Antypas**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ Imad.antypas@mail.ru

**Abstract**
***Introduction.*** Glass fibers significantly improve the quality of composite materials, make them lighter, stronger, more corrosion resistant and thermally stable. Strengths and weaknesses of specific composites are actively discussed in the scientific and applied literature. At the same time, the effect of the ratio of fibers and matrix material on the mechanical characteristics of composites has not been sufficiently investigated. The presented study is intended to fill this gap. The work is aimed at manufacturing a composite material on a polymer basis reinforced with glass fiber, and investigating the influence of weight ratios of elements on the mechanical characteristics of the composite. For the first time, a report on the comparison of the characteristics of composites (with different fiber content) to each other and to steel is published.
***Materials and Methods.*** Fiberglass and polyester were used as starting materials with the addition of a mediator to speed up the molding process. The samples were made manually and tested for tensile strength, hardness, and impact strength using standard equipment. The results were summarized in the form of tables, visualized in the form of graphs, and processed by comparative analysis.
***Results.*** The technique of creating samples and methods of their testing were described. The research showed that hardness, tensile strength and impact resistance increased with a growth in the percentage of randomly distributed fiberglass to 50% with 50% unsaturated polyester. In this case, the maximum values of tensile strength — 175.4 MPa, hardness — 38 HV and impact resistance — 1.56 J/mm$^2$ were obtained. The inexpediency of exceeding the proportion of fiberglass by more than 50% was experimentally proven, since mechanical properties deteriorated. This was due, in particular, to the fragility of the glass, which, if the proportions were violated, was transmitted to the entire composite. In addition, with an excessively high volume of reinforcing fibers, the resin was not enough for high-quality bonding of the elements, which significantly reduced the strength of the material. Most of the mechanical characteristics of a composite made of 50% polyester and 50% fiberglass are better than those of steel.
***Discussion and Conclusion.*** It has been proved that the properties of the composite material depend significantly on the glass fiber content. The resulting composite was compared to steel. It turned out that it had better mechanical characteristics and less weight. This allows us to recommend the material for boat hulls.

**Keywords:** glass fiber reinforcement, ratio of polyester to glass fiber in a composite, mechanical characteristics of a composite, comparison of composite and steel samples

**Acknowledgements.** The author would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their attentive attitude to the article, and comments that helped to improve the quality of the article.

**For citation.** Antypas IR. Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites. *Advanced Engineering Research* (*Rostov-on-Don*). 2023;23(4): 387–397. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397

**Введение.** Полимеры привлекательны как матрицы композитов благодаря сравнительно низкой плотности, легкости в обработке и превосходным механическим свойствам. Высокотемпературные смолы используются для производства самолетов, ракет, лодок и другой техники. Арматура (стекловолокно) воспринимает основную нагрузку, особенно если композит состоит из волокон, рассредоточенных в слабой матрице (пример — углеродно-эпоксидный композит). Таким образом, прочность и жесткость материала определяются прочностью и жесткостью волокон [1–4]. Основные преимущества композитов, армированных стекловолокном, — высокие прочность и модуль упругости. Благодаря низкому удельному весу, хорошему соотношению прочности и веса, эти материалы превосходят металлы. Кроме того, выверенное соотношение усталостной прочности и веса существенно повышает устойчивость многих композитных ламинатов к усталостным повреждениям [5, 6].

Авторы [7] доказали, что механические показатели композитов, армированных волокнами, зависят от свойств материалов, входящих в их состав (тип, количество, распределение и ориентация волокон, пустоты). Важную роль играют также природа межфазных связей и механизмы передачи нагрузки на границе раздела фаз.

Исследования [8] показали, что прочность на разрыв пластин из стеклопластика изменяется в зависимости от условий окружающей среды. В работе [9] рассматривались два типа композита с разным армированием стекловолокном: рубленым и смешанным с ненасыщенной полиэфирной смолой (стекловолокно 0/90).

Установлено, что композит, армированный рубленым стекловолокном, имел более высокий модуль упругости, максимальное напряжение и предел текучести, чем композит, армированный стекловолокном 0/90.

Авторы научных работ концентрировали внимание на особенностях различных типов стекловолокна и материалов матриц. При этом недостаточно исследована зависимость качества композита от соотношения объемов волокон и материала матрицы.

В представленной статье качества материалов сопоставляются по двум направлениям. Первая параллель — композиты с разным соотношением волокон и матрицы. Вторая — композит и сталь. Данные публикуются впервые.

Цель исследования заключалась в изучении влияния содержания стекловолокна на механические свойства материала, то есть на его поведение при нагрузке. Оценивались твердость, устойчивость к разрывам и ударам.

**Материалы и методы.** Для изготовления образцов в качестве исходных материалов использовали смолу (полиэстер) с добавлением веществ, ускоряющих реакцию, и стекловолокно (рис. 1).



Рис. 1. Стекловолокно

Полученные образцы испытывали на растяжение, твердость и ударную нагрузку. Аналогичные опыты проводились на стальных деталях. Каждый эксперимент повторялся пятикратно. От испытания к испытанию увеличивали процентное содержание стекловолокна, а затем брали средние значения результатов.

В таблице 1 приведены механико-физические свойства используемого стекловолокна.

Таблица 1

Механико-физические свойства стекловолокна [10]

| Показатель | Значение |
|---|---|
| Плотность, кг/м$^3$ | 2500 |
| Предел прочности, МПа | 2400 |
| Модуль упругости, ГПа | 85 |
| Удлинение, % | 0,01 |

В качестве основного материала использовался ненасыщенный полиэстер, который при комнатной температуре представляет собой вязкую жидкость. Его механические свойства представлены в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства полиэстера [10]

| Показатель | Значение |
|---|---|
| Плотность, кг/м$^3$ | 1200 |
| Предел прочности, МПа | 42 |
| Модуль упругости, ГПа | 2,8 |
| Удлинение, % | 3,2 |

**Вспомогательные материалы.** К ненасыщенному полиэстеру добавлялись следующие вещества [11]:

– кобальтовый жидкий материал для упрочнения (3–4 %);

– медиатор — стимулирующее вещество, используемое с целью ускорения осаждения (1,5–3 %).

**Измерение плотности стекловолокна.** Для определения плотности стекловолокна его погружали в воду в стандартном контейнере. Полученное значение $\rho$ = 2500 кг/м$^3$ совпало с эталонным.

**Испытание стекловолокна на растяжение.** Средний диаметр волокон выяснили с помощью микроскопа — 20,14 мкм. Рассчитав поперечное сечение одного волокна, определили их среднее число в пучке,

сравнивая массы волокон и пучка, из которого их взяли. Среднее число волокон в пучке оказалось равным 2200. Затем в зависимости от количества волокон рассчитали сечение пучка $A = 0{,}7$ мм$^2$.

Эксперименты затруднялись обрывами в местах крепления из-за хрупкости волокон. Давление зажимов растягивающего устройства на концы волокон снизили следующим образом. Специальную бумагу с хорошей впитывающей способностью залили смолистым материалом, поместили в него волокна и оставили при комнатной температуре до полного высыхания. Затем бумагу разрезали и получили образцы из пучков волокон, готовых к испытаниям (рис. 2).

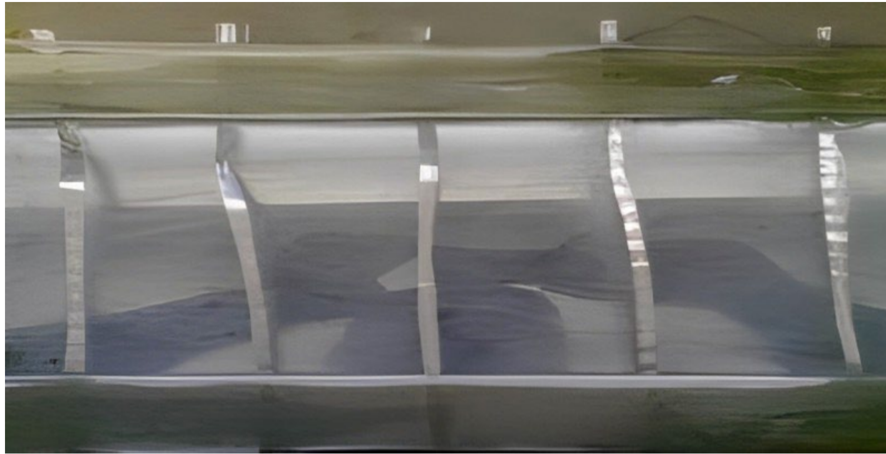


Рис. 2. Образцы волокон на растяжение

Размеры образцов на растяжение определялись в соответствии с указаниями международных стандартов ASTM D 2343–95[1] для таких испытаний. Параметры экспериментов: длина волокон между оправками — 25 см, длина оправок на обоих концах — 5 см, скорость приложения растягивающей нагрузки — 12,7 м/с, лабораторная температура — 23°C.

**Результаты исследования.**

**Изготовление образцов.** Изготовили образцы с различным массовым содержанием стекловолокна (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % и 60 %). Для этого смесь из 5 % полиэстера, кобальта и катализатора готовилась при комнатной температуре. Некоторое ее количество равномерно распределяли кистью по внутренней поверхности формы. Затем наносили слой со случайно распределенными стекловолокнами. Далее слои волокон пропитывались смесью и накладывались друг на друга, пока не получался окончательный образец соответствующих пропорций (рис. 3, 4).



*а*) *б*)

Рис. 3. Формы образцов: *а* — изготовление; *б* — готовые

[1] Standard Test Method for Tensile Properties of Glass Fiber Strands, Yarns, and Rovings Used in Reinforced Plastics. Англ. Стандартный метод испытания свойств на растяжение прядей, пряжи и ровингов из стекловолокна, используемых в армированных пластмассах. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/3930/2180b1c23fb041fe88bcfd3fba3fe2f6/ASTM-D2343-95.pdf (дата обращения: 27.09.2023).

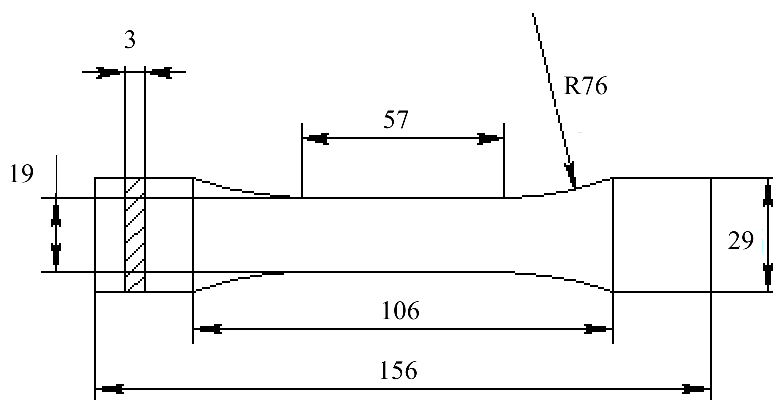



Рис. 4. Форма стандартного образца

Готовые образцы доставали из формы, очищали и помещали в сухую среду на 24 часа.

**Испытания на растяжение.** Испытания на растяжение проводили в соответствии с ISO 326 ASTMD 638[2], как показано на рис. 5. Образец прочно закреплялся на обоих концах растяжного устройства. К нему постепенно прикладывалась растягивающая нагрузка от нуля до 20 Н/мин, пока образец не разрушался.



Рис. 5. Растяжное устройство

Процесс растяжения разделялся на три области. В первой происходило скольжение между губками зажима и поверхностями образца, поэтому образцы хорошо зажимались. Во второй области из-за упругого поведения контактирующих поверхностей материалов наблюдалась прямая зависимость между напряжением и деформацией. Третья область — после разрушения образца. Оно не было ни полным, ни внезапным, потому что шло равномерно в зависимости от углов ориентации волокон в слоях стекломата. В результате получили показатели максимальной прочности на разрыв и упругой деформации образцов.

Предел прочности при растяжении $\sigma_C^R$, который выражает напряжение разрушения композиционного материала, рассчитывался по соотношению [12]:

$$\sigma_C^R = \frac{F_{\max}}{B \cdot e},$$

где $F_{max}$ — максимальная сила, которая привела к разрушению образца, Н; $B$ — ширина образца, мм; $e$ — толщина образца, мм.

На рис. 6 показаны результаты испытаний стекловолокна при растяжении.

[2] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Англ. Стандартный метод испытания свойств пластмасс на растяжение. URL: https://tienda.aenor.com/norma-astm-d638-99-017910 (дата обращения: 27.09.2023).

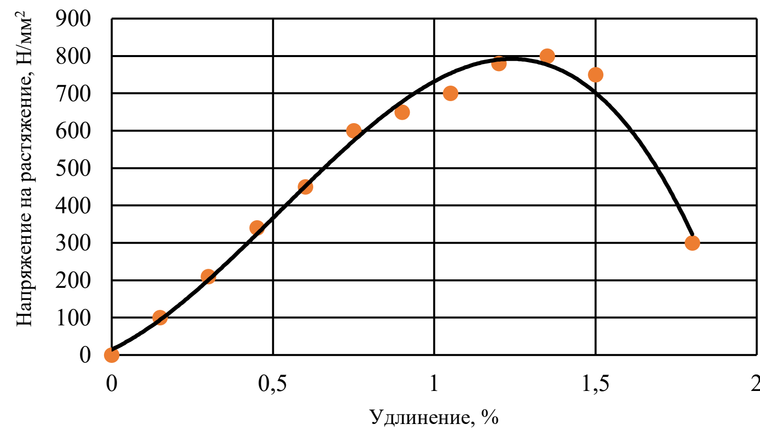



Рис. 6. Поведение волокон при растяжении

По данным рис. 6 рассчитали значение модуля упругости при растяжении. Установили его среднее значение $E$ = 80000 МПа, которое приняли для дальнейших испытаний.

На рис. 7 и в таблице 3 показаны результаты влияния процентного содержания волокон на прочность при испытаниях на разрыв.

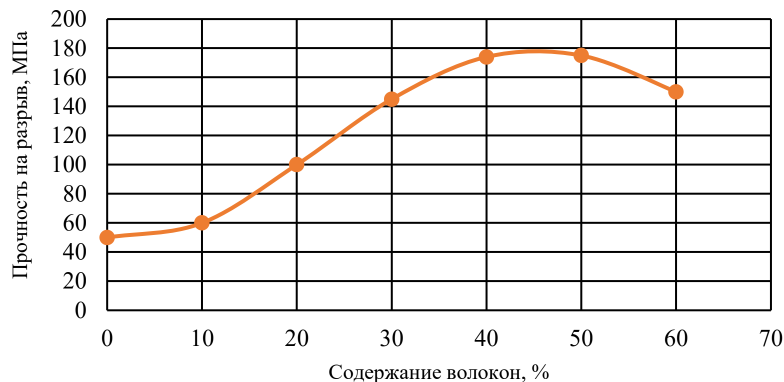



Рис. 7. Влияние процентного содержания волокон на прочность образцов при испытаниях на разрыв

Снижение значения прочности на разрыв при содержании волокон 60 % связано с тем, что полиэстера становится недостаточно для связывания такой массы волокон. Следовательно, силы сцепления между основным и армирующим материалами уменьшаются.

Таблица 3

Значения прочности на разрыв в зависимости от процентного содержания волокон для каждого образца

| Содержание волокон в образце, % | Значения прочности на разрыв, МПа |
|---|---|
| 0 | 50 |
| 10 | 63,3 |
| 20 | 101,5 |
| 30 | 145,7 |
| 40 | 174,3 |
| 50 | 175,4 |
| 60 | 150,2 |

Из рис. 8 и таблицы 4 видно, как содержание стекловолокна влияет на упругую деформацию образцов. Следует отметить, что с увеличением содержания волокон показатель упругой деформации возрастает и достигает максимального значения (2,71 %) при 50 %. С дальнейшим ростом массы волокон упругая деформация уменьшается, что связано с высокой прочностью стекловолокна на разрыв.

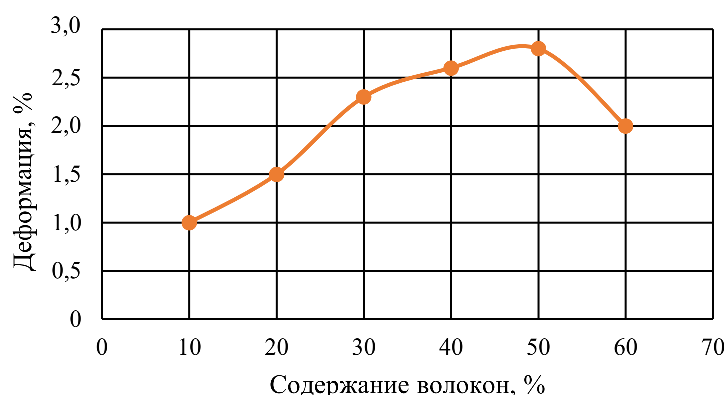



Рис. 8. Влияние содержания волокон на упругую деформацию

Таблица 4

Влияние содержания волокон в образцах на упругую деформацию

| Содержание волокон в образцах, % | Значения упругой деформации, % |
|---|---|
| 10 | 1,04 |
| 20 | 1,30 |
| 30 | 2,32 |
| 40 | 2,60 |
| 50 | 2,71 |
| 60 | 2,10 |

**Испытания на ударопрочность.** В опытах задействовали устройство Шарпи в соответствии с ISO 179[3]. Использовались образцы с размерами (80×10×4 мм) аналогичные тем, что показаны на рис. 9:

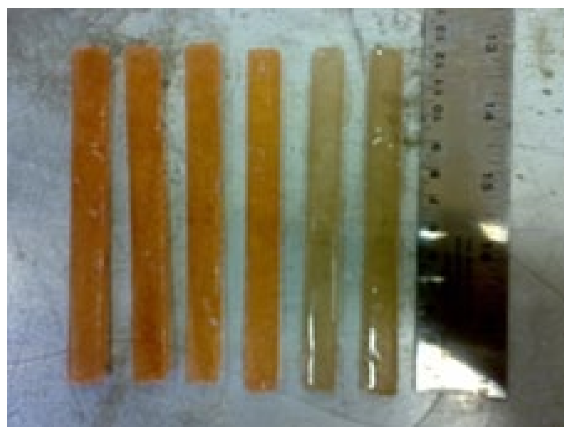


Рис. 9. Образцы для испытаний ударопрочности

Прочность рассчитывалась делением значения затраченной энергии на площадь сечения образца:

$$R = \frac{E}{A},$$

где $R$ — ударопрочность, Дж /мм$^2$; $E$ — затраченная энергия, Дж; $A$ — площадь поперечного сечения образца мм$^2$.

На рис. 10 и в таблице 5 показано, как содержание волокон влияет на ударопрочность.

[3] ISO 179-1:2010. Пластмассы. Определение ударной прочности по Шарпи. Часть 1. Неинструментальный метод испытания на удар. URL: https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=4569214 (дата обращения: 27.09.2023).

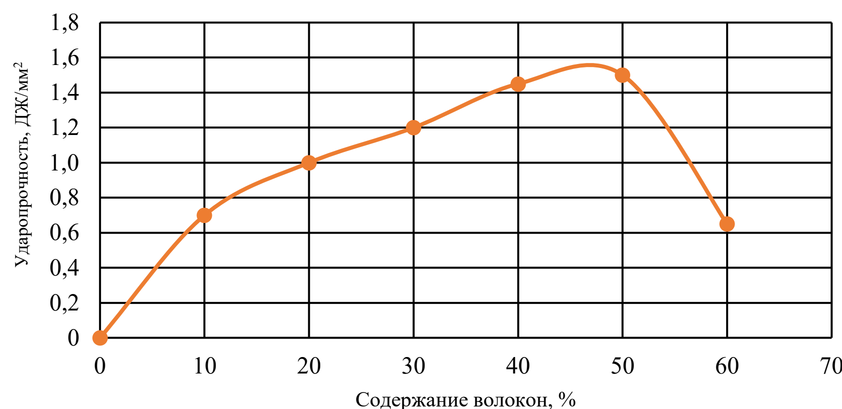



Рис. 10. Влияние содержания волокон на ударопрочность

Ударопрочность увеличивается с повышением содержания волокон до 50 %. Это объясняется ростом силы сцепления в результате насыщения волокон полиэстером в композиционном материале. Если же вес волокон превышает 50 %, ударопрочность снижается. Это обусловлено хрупкостью стекла [7, 13].

Таблица 5

Влияние содержания волокон на ударопрочность

| Содержание волокон в образцах, % | Значения ударопрочности, Дж/мм$^2$ |
|---|---|
| 10 | 0,75 |
| 20 | 1,27 |
| 30 | 1,37 |
| 40 | 1,45 |
| 50 | 1,56 |
| 60 | 0,70 |

**Испытания на твердость.** Твердость образцов проверялась на твердомере, а число Виккерса рассчитывалось по соотношению:

$$HV = 1,854\frac{P}{D^2},$$

где: $P$ — приложенная нагрузка, кН; $D$ — диаметр удара, мм.

Испытания показали рост твердости при увеличении содержания стекловолокна до 50 % (рис. 11 и таблица 6).

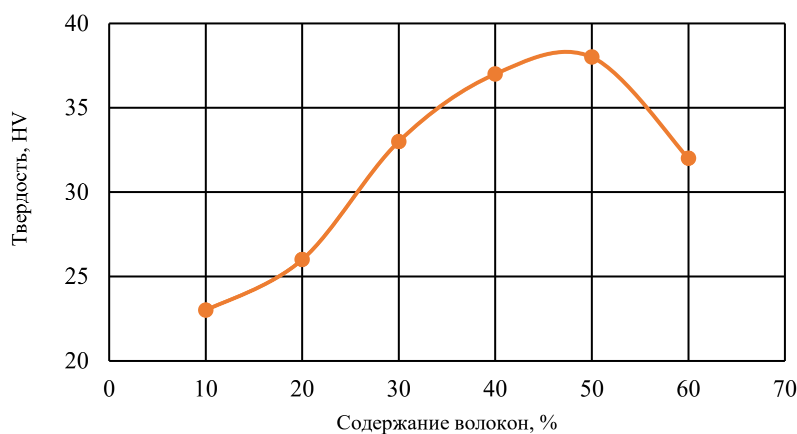



Рис. 11. Влияние содержания стекловолокна на твердость

Таблица 6

Влияние процентного содержания волокна на значения твердости

| Содержание стекловолокна в образцах, % | Значения твердости, HV |
|---|---|
| 10 | 23,0 |
| 20 | 26,0 |
| 30 | 33,0 |
| 40 | 37,2 |
| 50 | 38,0 |
| 60 | 32,0 |

При увеличении процентного содержания стекловолокна до 50 % усиливается твердость композита. Волокна и полимерные цепи соединяются в случайном порядке. В результате усиливается сопротивление композита проникновению, то есть твердость [7, 13]. Если же содержание волокон превышает 50 %, твердость сокращается из-за диспропорции волокон и полиэстера (его в этом случае недостаточно для завершения соединения армирующего и основного материалов).

Отметим также, что в процессе исследования доказана неточность выводов в работе [14]. Рассматривались полиэстерные композиты с массой армирующего Е-стекловолокна 15 %, 30 %, 45 % и 60 %. Исследовалось влияние содержания стекловолокна на такие механические свойства, как прочность на разрыв и изгиб, ударная вязкость. Твердость композитов оценивалась при помощи твердомера Бринелля. Результаты показали значительное улучшение механических свойств композита с увеличением массы стекловолокна, особенно при показателе 60 %. Однако авторы использовали слишком большой диапазон содержания стекловолокна в композите, что осложняет оценку точности полученных результатов. Кроме того, не учитывались процессы разрушения волокон, не проверялись их свойства.

**Испытание стального образца.** В соответствии со стандартом ASTM[4] образцы изготовили из листовой стали А36. Испытания на растяжение, удар и твердость проводились так же, как для образцов из полиэстера, армированных стекловолокном.

В таблице 7 приводятся результаты механических испытаний стальных образцов и их сравнение с образцами из композитного материала со стекловолокном 50 % (такой состав композита показал лучшие результаты).

Таблица 7

Сравнение результатов механических испытаний стальных образцов и образцов
из композиционного материала с содержанием стекловолокна 50 %

| Механические испытания | Образцы из стали марки А36 | Образцы из композиционных материалов с содержанием стекловолокна 50 % |
|---|---|---|
| Прочность на разрыв, МПа | 400 | 175,4 |
| Ударопрочность, Дж/мм$^2$ | 0,61 | 1,56 |
| Упругая деформация, % | 0,11 | 2,71 |
| Твердость, HV | 135,5 | 38 |

**Обсуждение и заключение.** Итак, прочность на разрыв полиэстерного композита существенно возрастает с увеличением массы стекловолокна и достигает максимального значения 175,4 МПа при содержании армирующего материала 50 %. Незначительное содержание волокон (они постепенно разрушаются) обусловливает слабость композита.

Механические характеристики материала из 50 % полиэстера и 50 % стекловолокна лучше, чем у стали (кроме прочности на разрыв). Это позволяет использовать композит для производства лодок, т. к. в этом случае прочность на разрыв не основная характеристика [15]. Лодки, изготовленные из ненасыщенного полиэстера, армированного стекловолокном, на 75 % легче стальных. Сталь не устойчива к коррозии, что делает лодки из композиционного материала более долговечными.

[4] ASTM (American society for testing and materials). Англ. Американское общество испытаний и материалов. Название комплекса стандартов и организации в США, издающей нормативы для использования в различных отраслях производства. Стандарты ASTM регламентируют химический состав, механические, физические и электрические свойства материалов, виды обработки, способы изготовления, методы испытаний и тестирований, а также требования к металлопрокату. URL: https://almet.ru/directory/standards/astm.html (дата обращения: 27.09.2023).

Экспериментально установлено ухудшение качества композита, если содержание армирующих волокон превышает 50 %. Указаны две основные причины такого явления. Первая: при чрезмерной массе стекла его хрупкость передается всему материалу. Вторая: при непропорционально большом объеме волокон смолы недостаточно для их скрепления, что негативно сказывается на прочности.

**Список литературы**


1. Kumar S.N., Kumar V.G., Kumar V.C., Prabhu M. Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*. 2018;5(5):19–26. https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V5I5P104

2. Bhowmick A.K. Mechanical Properties of Polymers. *Material Sciences & Engineering*. 2016;1:453–461. URL: https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-36-01-03.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

3. Hinton M.J., Soden P.D., Kaddour A.S. (eds) *Failure Criterion Fibre-Reinforced-Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2004. 1269 p.

4. Ravi Jain, Luke Lee. (eds) *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012. 280 p. http://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3

5. Meijer H.E., Govaert L.E. Mechanical Performance of Polymer Systems: The Relation between Structure and Properties. *Progress in Polymer Science.* 2005;30(8–9);915–938. http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009

6. Lewin M. (ed) *Handbook of Fiber Chemistry. International Fiber Science and Technology Series,* 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. 1056 p. https://doi.org/10.1201/9781420015270

7. Varga Cs., Miskolczi N., Bartha L., Lipóczi G. Improving the Mechanical Properties of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Modification of Fibre Surface. *Materials and Design.* 2010;31(1):185–193. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.034

8. Agarwel A., Garg S., Rakesh P.K., Singh I., Mishra B.K. Tensile Behaviour of Glass Fiber Reinforced Plastics Subjected to Different Environmental Conditions. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.* 2010;17(6):471–476. URL: https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10873/1/IJEMS%2017%286%29%20471-476.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

9. Estabraq T. Abdullah. A Study of Bending Properties of Unsaturated Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites. *Al-Nahrain Journal of Science.* 2013;16(3):129–132. http://doi.org/10.22401/JNUS.16.3.18

10. Gornet L. *Généralités sur les matériaux composites*. Nantes, France: ECN; 2008. 51 p. URL: https://cel.hal.science/file/index/docid/470296/filename/MatComposites.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

11. Noorshashillawati Azura Binti Mohammad. *Characterization and Properties of the New Unsaturated Polyester Resins for Composite Application.* Gelugor, MYS: School of Industrial Technology; 2007. 125 p. URL: https://core.ac.uk/reader/32600400 (дата обращения: 06.09.2023).

12. Yilmaz H. Tensile Strength Testing of Thin Spray-on Liner Products (TSLs) and Shotcrete. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(10):559–569. URL: http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n10/01.pdf (дата обращения: 06.09.2023).

13. Aramide F.O., Atanda P.O., Olorunniwo O.O. Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. *International Journal of Composite Materials.* 2012;2(6):147–151. https://doi.org./10.5923/j.cmaterials.20120206.06

14. El-Wazerya M.S., El-Elamy M.I., Zoalfakar S.H. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering.* 2017;14(3):121–131. https://doi.org/10.6703/IJASE.2017.14(3).121

15. Shenoi R.A., Dulieu-Barton J., Quinn S. Composite Materials for Marine Applications: Key Challenges for the Future. In book: Nicolais L., Meo M., Milella E. (eds) *Composite Materials.* London: Springer; 2011. C. 69–89. http://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_3


**References**


1. Kumar SN, Kumar VG, Kumar VC, Prabhu M. Experimental Investigation on Mechanical Behavior of E-Glass and S-Glass Fiber Reinforced with Polyester Resin. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*. 2018;5(5):19–26. https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V5I5P104

2. Bhowmick AK. Mechanical Properties of Polymers. *Material Sciences & Engineering*. 2016;1:453–461. URL: https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-36-01-03.pdf (accessed: 06.09.2023).

3. Hinton MJ, Soden PD, Kaddour AS. (eds) *Failure Criterion Fibre-Reinforced-Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2004. 1269 p.

4. Ravi Jain, Luke Lee. (eds) *Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications. Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012. 280 p. http://doi.org/10.1007/978-94-007-2357-3

5. Meijer HE, Govaert LE. Mechanical Performance of Polymer Systems: The Relation between Structure and Properties. *Progress in Polymer Science.* 2005;30(8–9);915–938. http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009

6. Lewin M (ed). *Handbook of Fiber Chemistry. International Fiber Science and Technology Series,* 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2006. 1056 p. https://doi.org/10.1201/9781420015270

7. Varga Cs, Miskolczi N, Bartha L, Lipóczi G. Improving the Mechanical Properties of Glass-Fibre-Reinforced Polyester Composites by Modification of Fibre Surface. *Materials and Design.* 2010;31(1):185–193. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.034

8. Agarwel A, Garg S, Rakesh PK, Singh I, Mishra BK. Tensile Behaviour of Glass Fiber Reinforced Plastics Subjected to Different Environmental Conditions. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences.* 2010;17(6):471–476. URL: https://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/10873/1/IJEMS%2017%286%29%20471-476.pdf (accessed: 06.09.2023).

9. Estabraq T Abdullah. A Study of Bending Properties of Unsaturated Polyester/Glass Fiber Reinforced Composites. *Al-Nahrain Journal of Science.* 2013;16(3):129–132. http://doi.org/10.22401/JNUS.16.3.18

10. Gornet L. *Généralités sur les matériaux composites*. Nantes, France: ECN; 2008. 51 p. URL: https://cel.hal.science/file/index/docid/470296/filename/MatComposites.pdf (accessed: 06.09.2023).

11. Noorshashillawati Azura Binti Mohammad. *Characterization and Properties of the New Unsaturated Polyester Resins for Composite Application.* Gelugor, MYS: School of Industrial Technology; 2007. 125 p. URL: https://core.ac.uk/reader/32600400 (accessed: 06.09.2023).

12. Yilmaz H. Tensile Strength Testing of Thin Spray-on Liner Products (TSLs) and Shotcrete. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(10):559–569. URL: http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n10/01.pdf (accessed: 06.09.2023).

13. Aramide FO, Atanda PO, Olorunniwo OO. Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. *International Journal of Composite Materials.* 2012;2(6):147–151. https://doi.org./10.5923/j.cmaterials.20120206.06

14. El-Wazerya MS, El-Elamy MI, Zoalfakar SH. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering.* 2017;14(3):121–131. https://doi.org/10.6703/IJASE.2017.14(3).121

15. Shenoi RA, Dulieu-Barton J, Quinn S. Composite Materials for Marine Applications: Key Challenges for the Future. In book: Nicolais L, Meo M, Milella E. (eds) *Composite Materials*. London: Springer; 2011. C. 69–89. http://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_3

**Поступила в редакцию** 29.09.2023
**Поступила после рецензирования** 31.10.2023
**Принята к публикации** 22.11.2023

*Об авторе:*

**Имад Ризакалла Антибас,** кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7371-0223, ScopusID, ResearchID, ORCID, imad.antypas@mail.ru

*Конфликт интересов:* автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**Received** 29.09.2023
**Revised** 31.10.2023
**Accepted** 22.11.2023

*About the Author:*

**Imad Rizakalla Antipas,** Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fundamentals of Machinery Design Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7371-0223, ScopusID, ResearchID, ORCID, imad.antypas@mail.ru

*Conflict of interest statement:* the author does not have any conflict of interest.

*The author has read and approved the final manuscript.*